第46卷 第5期
2023年5月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 5
May 2023

1957—2019年山西省暴雨时空分布特征与暴雨灾害风险评估

李乐乐[1]， 钞锦龙[1]， 赵德一[2]， 李浩杰[1]， 吴林栋[3]， 李佳骏[1]

（1. 太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619；2. 古交市气象局，山西 太原 030200；
3. 山西省气象信息中心，山西 太原 030600）

摘 要： 利用1957—2019年山西省27个气象站点逐日降水数据，使用小波分析等方法对山西省暴雨时空分布特征进行分析，并基于自然灾害理论使用决策分析法（AHP）进行暴雨灾害风险评估。结果表明：（1）从时间尺度上看，山西省暴雨发生时间呈现周期性和季节性；暴雨年际变化存在4 a、9 a、14~15 a和27~28 a 4个时间尺度震荡，且震荡周期在缩短，暴雨发生的频次呈增加趋势；暴雨季节分配不均匀，多集中在夏季且形成暴雨灾害的几率较大，每年6—8月期间累积暴雨日数占全年比重高达85.23%，其中7月占比最大，达到45.18%。（2）从空间尺度上看，暴雨多发生在山西省中南部和海拔较高的山区，整体呈现出由东南向西北递减的规律，地区差异明显；以恒山为界，以南区域强降水发生的概率以及暴雨量普遍要高于北部区域，其中垣曲、五台山、阳城年平均暴雨量在65 mm以上，累积暴雨日数超过60 d。（3）通过对山西省暴雨灾害风险进行评估，发现山西省暴雨灾害综合风险等级空间上呈现出由南向北逐渐递减的趋势，运城盆地东北部属于高风险区，而山西省东北、西北地区则属于低风险区，其余大部分地区属于中风险区和次高风险区。

关 键 词： 暴雨；小波分析；时空分布；灾害风险评估；山西省

文章编号： 1000-6060(2023)05-0689-11(0689~0699)

中国是暴雨洪涝灾害发生频次最高的国家之一，对人民的生命安全和社会经济发展造成严重影响[1-2]。我国暴雨洪涝灾害的主要特征是受东亚季风影响，暴雨活动频繁，具有明显的年代际变化、年际变化、季节变化和季节内震荡[3]。年均暴雨量的分布具有明显的地域性，年均暴雨日数的地域分布与年均暴雨量的分布相一致，但不同的季节年均暴雨日数及其地域分布有明显差异[4-7]。研究发现，降水量和降水频次是洪涝灾害发生的主要影响因素[8-9]。我国的暴雨事件主要集中在5—9月，由东南沿海向西北内陆不断减少[10-11]。在暴雨洪涝灾情分布上具有明显的地区差异性，西北地区在暴雨洪涝灾害受灾率、经济损失和伤亡人数等方面要远高于东南沿海地区[12]。如何有效降低暴雨洪涝灾害损失已成为各个国家和地区以及学者们共同关注的话题。在已有研究中，决策分析法（AHP）和地理信息系统（GIS）等方法模型被广泛应用到自然灾害风险预测和评估中[13]。裴惠娟等[14]利用AHP方法结合自然灾害风险评估理论，对甘肃省暴雨洪水时空分布及风险评估进行研究，绘制出甘肃省暴雨洪水灾害综合风险区划图。杨幸等[15]则利用GIS对汉中市的气象灾害进行风险评估，得出暴雨洪涝灾害高风险区多位于山区，而平原地区风险较低。暴雨洪涝灾害风险评估应综合考虑致灾因子、承灾体和防灾能力

收稿日期： 2022-08-29； **修订日期：** 2022-10-07
基金项目： 山西省哲学社会科学基金项目（2022YY122）；山西省高等学校科技创新项目（2021L419）；国家自然科学基金项目（42101013）资助
作者简介： 李乐乐(1998-)，男，硕士研究生，主要从事区域气候变化和自然灾害方面的研究. E-mail: Lill4519@163.com
通讯作者： 钞锦龙(1984-)，男，博士，副教授，主要从事区域气候变化和自然灾害方面的研究. E-mail: chaojlnet@163.com

等因素[16]。更多还原孙鹏[17]、刘慧等[18]基于自然灾害评估理论对区域暴雨洪涝灾害风险实现综合评价，并绘制出暴雨风险等级图，同时分析暴雨洪涝灾害风险空间特征，提高了风险评估的实用性和科学性。结合遥感影像进行洪水灾害风险评估研究，有利于防洪减灾工程的规划[19]。对区域暴雨灾害进行科学风险评估将更有效地指导区域灾害防范以及工农业生产活动。

近年来，随着全球气候变暖，山西省暴雨灾害发生的强度和频率逐渐增加，严重影响了该省的社会经济发展[20]。已有相关研究主要是针对山西省及部分地区短时期暴雨时空变化规律及影响因素方面的研究[21-23]，对未来防灾减灾的指导性意义不大。而针对山西省的暴雨灾害风险评估方面少有研究。通过对历史数据的研究有利于更好地了解暴雨近期的变化，针对这一现状，本研究结合1957—2019年近63 a的历史降水数据，对山西省暴雨灾害时空分布进行深入分析，并且在此基础上基于自然灾害评估理论、GIS等方法，对山西省进行暴雨灾害的灾害风险评估，从而为区域暴雨防洪减灾、加强灾害风险管理以及所涉及灾害重建等工作提供科学依据。

1 研究区概况

山西省(34°34′~40°44′N，110°14′~114°33′E)地处黄土高原东部，总面积15.67×10⁴ km²；属于温带季风气候，年平均降水量大约在400~650 mm之间，降水时间分配不均，约70%年降水量集中于6—9月[24]。境内地貌复杂多样，山区面积约占80%，地质灾害多发。山西省辖11个地级市，117个县级行政单位。2019年全省常住人口3729.22×10⁴人，国民生产总值达到17026.7×10⁸元，人均GDP为45724元[25]。2019年全省遭受各类自然灾害所造成的直接经济损失120.8×10⁸元，同上年增长9.6%，农作物受灾面积142.2×10⁴ hm²，增加68.8%，其中因暴雨洪涝灾害造成的农作物受灾面积达到71.5×10³ hm²[25-26]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

气象数据主要来自中国气象数据网(http://data.cma.cn)，基于研究工作的可行性原则和数据的客观性原则并结合实际，在山西省相对均匀地选取了27个气象站点，分别为右玉、大同、河曲、天镇、朔州、五台山、灵丘、五寨、兴县、原平、平定、离石、太原、太谷、榆社、隰县、吉县、介休、临汾、安泽、长治、襄垣、运城、侯马、垣曲、阳城、永济。所获得的数据经过严格检验，质量良好，数据准确无误。社会经济数据来自中国民政部和《山西省统计年鉴》[25]。使用ArcGIS 10.2、Matlab以及Origin 2018软件进行数据分析与图表绘制。

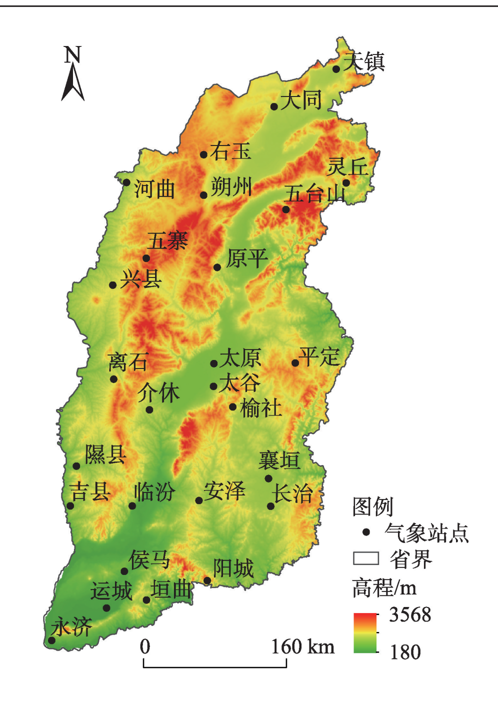


图1 研究区27个气象站点分布

Fig. 1 Distribution of the 27 meteorological stations in the study area

2.2 研究方法

2.2.1 小波分析 小波分析在大气科学以及水文水资源科学等研究中被广泛应用。小波分析可以探测不同时间尺度内的瞬时成分和频率成分，研究多个时间尺度的变化成分[27]。Morlet小波因在时间与频率的局部化之间具有较好的平衡，所以本文通过Matlab使用Morlet小波函数对山西省暴雨进行时间序列分析[28-29]。计算公式如下：

$$\varphi(t)=\mathrm{e}^{ict}+\mathrm{e}^{\frac{t^2}{2}} \quad (1)$$

式中：$\varphi(t)$为小波函数；i为虚数；t为时间；c为无量纲频率。

2.2.2 决策分析法(AHP) 本文使用AHP分析法来确定暴雨灾害风险评估多个指标权重，首先，需要

构建判断矩阵，主要通过专家评价对各指标要素进行两两比较并给出评分(1~9)，为确保不会出现由于专家意见不同，导致各要素重要性矛盾的现象，还需对上述矩阵进行一致性检验，通过一致性检验后最终确定目标权重大小[30]。具体计算公式如下：

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(Aw)_i}{w_i} \tag{2}$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{3}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{4}$$

式中：λ_{max}为最大特征值；$(Aw)_i$为矩阵A与权重矩阵w相乘后产生的权重值；w_i为权重矩阵w的权重值；CI为最大特征根值；n为矩阵维数；RI为随机一致性指标，由一致性检验RI表得出RI=0.52；CR为一致性比率，当CR<0.1时，认为所得的层次排序权重是正确的、合理的，否则需要重新调整判断矩阵，直到一致性检验合格为止。计算结果详见表1~5。

2.2.3 暴雨灾害风险评估指标体系的构建 暴雨灾害的形成是多种因素共同作用的结果。本文运用AHP探究山西省空间暴雨灾害风险评估的问题，结合自然灾害系统理论，主要集中于4个方面(准则层)和10个具体指标层作为评估标准[31-32]，利用层次分析法确定各项指标权重(表6)。本文利用克里金插值法绘制山西省暴雨日数及灾害风险指数评估等级划分图，采用自然断点法进行色彩分级。

表1 准则层指标权重判断矩阵及一致性检验

Tab. 1 Weight judgment matrix of criterion layer indices and consistency test

准则层	致灾因子	孕灾环境	承灾体	防灾减灾能力	权重值/%
致灾因子	1	4	5	7	58.098
孕灾环境	1/4	1	3	5	24.290
承灾体	1/5	1/3	1	3	12.011
防灾减灾能力	1/7	1/5	1/3	1	5.601
λ_{max}=4.180，CI=0.060，RI=0.890，CR=0.067<0.1					

注：λ_{max}为最大特征值；CI为最大特征根值；RI为随机一致性指标；CR为一致性比率。下同。

表2 致灾因子指标层权重判断矩阵及一致性检验

Tab. 2 Weight judgment matrix of disaster factors indices layer and consistency test

致灾因子	年均降雨量	年均暴雨日数	日最大降雨量	权重值/%
年均降雨量	1	1/7	1/3	8.331
年均暴雨日数	7	1	5	72.351
日最大降雨量	3	1/5	1	19.319
λ_{max}=3.066，CI=0.033，RI=0.520，CR=0.063<0.1				

表3 孕灾环境指标层权重判断矩阵及一致性检验

Tab. 3 Weight judgment matrix of gestational disaster environment indices layer and consistency test

孕灾环境	海拔高程	地形坡度	河网密度	权重值/%
海拔高程	1	1/2	1/3	16.378
地形坡度	2	1	1/2	29.726
河网密度	3	2	1	53.896
λ_{max}=3.009，CI=0.005，RI=0.520，CR=0.009<0.1				

表4 承灾体指标层权重判断矩阵及一致性检验

Tab. 4 Weight judgment matrix of disaster bearing body indices layer and consistency test

承灾体	人口密度	地均GDP	耕地面积比	权重值/%
人口密度	1	2	3	53.896
地均GDP	1/2	1	2	29.726
耕地面积比	1/3	1/2	1	16.378
λ_{max}=3.009，CI=0.005，RI=0.520，CR=0.009<0.1				

表5 防灾减灾能力指标层权重判断矩阵及一致性检验

Tab. 5 Weight judgment matrix of disaster prevention and mitigation capacity indices layer and consistency test

防灾减灾能力	人均GDP	权重值/%
人均GDP	1	100
λ_{max}=0，CI=RI=0		

2.2.4 自然灾害风险评估模型 所谓自然灾害风险评估是从灾害的各个方面，尤其是致灾因子、灾情程度两方面[33]，定量化预估、分析不同强度灾害发生的可能性及所造成的后果。本文根据自然灾害系统论及风险评估理论，选取相关指标，建立了暴雨灾害风险评估模型。公式如下：

致灾因子危险指数(S_1)公式：

$$S_1 = P_1 \times Z_1 + P_2 \times Z_2 + P_3 \times Z_3 \tag{5}$$

式中：Z_1为年均降雨量标准化值；Z_2为年均暴雨日数标准化值；Z_3为日最大降雨量标准化值；P_1、P_2、P_3为对应指标权重值。

孕灾环境敏感指数(S_2)公式：

$$S_2 = P_4 \times (1 - Z_4) + P_5 \times (1 - Z_5) + P_6 \times Z_6 \tag{6}$$

式中：Z_4为海拔高程标准化值；Z_5为地形坡度标准化

表6 暴雨灾害风险评估指标体系

Tab. 6 Risk assessment index system of rainstorm disaster

目标层	准则层	准则层权重值/%	指标层	指标层权重值/%
暴雨灾害风险评估	致灾因子	58.098	年均降雨量/mm	8.331
			年均暴雨日数/d	72.351
			日最大降雨量/mm	19.319
	孕灾环境	24.290	海拔高程/m	16.378
			地形坡度/(°)	29.726
			河网密度/%	53.896
	承灾体	12.011	人口密度/人·km^{-2}	53.896
			地均GDP/10^4元	29.726
			耕地面积比/%	16.378
	防灾减灾能力	5.601	人均GDP/元	100.000

值;Z_6为河网密度标准化值;P_4、P_5、P_6为对应指标权重值。

承灾体脆弱指数(S_3)公式:

$$S_3 = P_7 \times Z_7 + P_8 \times Z_8 + P_9 \times Z_9 \qquad (7)$$

式中:Z_7为人口密度标准化值;Z_8为地均GDP标准化值;Z_9为耕地面积比标准化值;P_7、P_8、P_9为对应指标权重值。

防灾减灾能力指数(S_4)公式:

$$S_4 = P_{10} \times Z_{10} \qquad (8)$$

式中:Z_{10}为人均GDP标准化值;P_{10}为对应权重值。

暴雨灾害综合风险指数($S_{综合}$)公式:

$$S_{综合} = O_1 \times S_1 + O_2 \times S_2 + O_3 \times S_3 + O_4 \times (1 - S_4) \qquad (9)$$

式中:S_1为致灾因子危险指数;S_2为孕灾环境敏感指数;S_3为承灾体脆弱指数;S_4为防灾减灾能力指数;O_1、O_2、O_3、O_4为对应指标权重。

3 结果与分析

3.1 暴雨时间分布特征

3.1.1 暴雨年际变化 根据山西省27个气象站点1957—2019年的逐日降水数据,绘制出山西省历年的累积暴雨日数、年平均暴雨量年际变化趋势(图2)。从图2可以看出,1957—2019年山西省年累积暴雨日数同年平均暴雨量的变化趋势大致吻合,暴雨日数多的年份平均暴雨量也相对较大。在暴雨日数多的年份,更容易引发暴雨灾害且损失严重,如1958、1964年和1971年等。平均暴雨量的波动幅度总体上较为平稳,随时间推移略有下降,但暴雨发生的频率增加,历年的平均暴雨量约为67 mm。累积暴雨日数变化幅度较大,其变化存在一定的规律性,2006年以后,累积暴雨日数呈增加趋势且间隔时间缩短,其中2013年累积暴雨日数高达17 d,是63 a来暴雨日数最多的年份。

3.1.2 暴雨年内变化 山西省的暴雨主要集中在4—10月,7月为峰值,累积暴雨日数达到520 d(图3)。4—10月暴雨日数占比分别为0.52%、3.39%、6.60%、45.18%、33.45%、9.30%、1.56%。7—8月暴雨日数最多,占比达到78.63%。说明夏季是山西省暴雨的高发期,降水集中,也反映出山西省降水时间分配不均匀与降水极端事件频发共生的事实[34]。

3.1.3 暴雨周期分析 山西省1957—2019年暴雨日数年际变化过程中具有多个周期变化特征,分别为5 a、9 a、14~15 a、27~28 a 4个时间尺度的周期变化(图4、图5)。其中,27~28 a时间尺度上表现出暴雨日数多-少交替的准3次周期震荡变化;14~15 a时间尺度上存在暴雨日数多-少交替准6次周期震荡变化,以上2个时间尺度呈现的周期变化均有稳定性和全域性;而5 a和9 a时间尺度在20世纪80年代之前周期震荡并不显著,之后较为稳定。27~28 a及14~15 a的周期一直持续,而9 a周期的振荡信号微弱。

3.2 暴雨空间分布特征

山西省暴雨日数空间分布整体上呈现由东南向西北方向递减趋势(图6),暴雨日数最多的地区是晋南地区的垣曲县、阳城县,累积暴雨日数分别达到83 d、64 d,其次是海拔较高的五台山地区,累积暴雨日数为77 d。而晋北地区如大同市、天镇县、右玉县等暴雨日数较少,累积暴雨日数在20~30 d

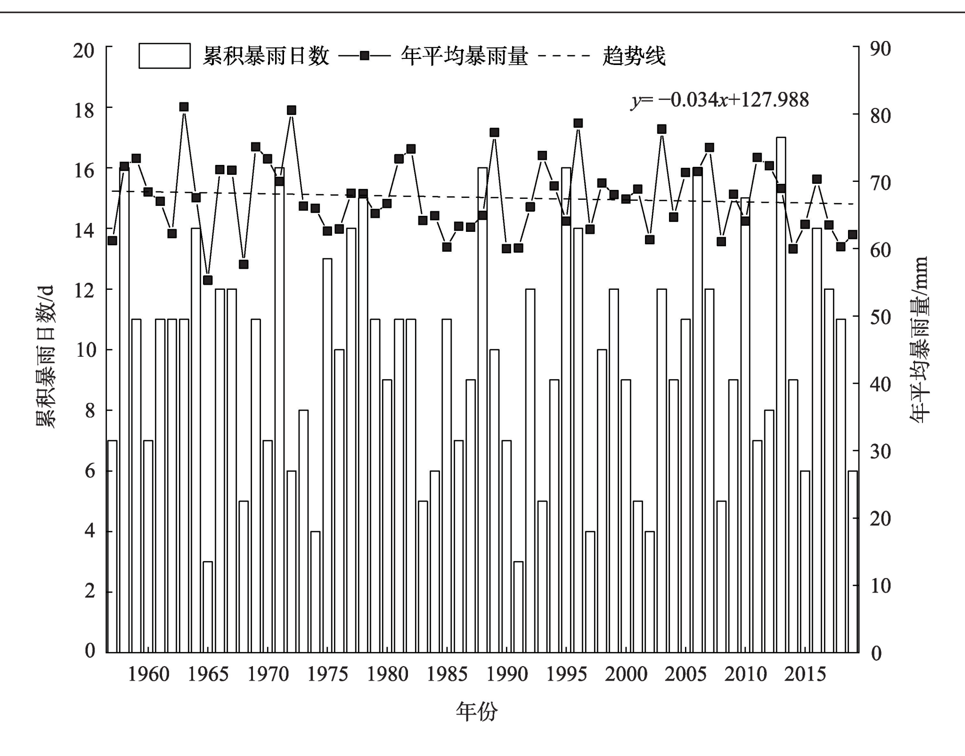


图2 山西省累积暴雨日数、年平均暴雨量年际变化

Fig. 2 Interannual variation of cumulative rainstorm days and annual average rainstorm amount in Shanxi Province

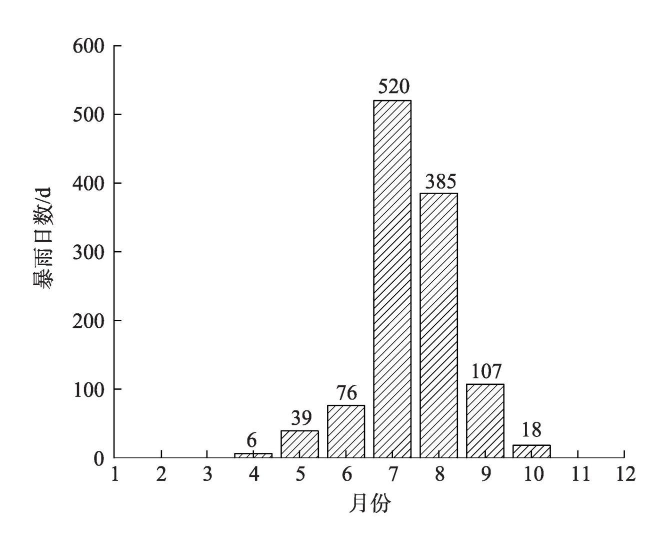


图3 山西省暴雨日数的年内分布

Fig. 3 Annual distribution of rainstorm days in Shanxi Province

左右。中部地区累积暴雨日数介于两者之间。暴雨事件多发生于恒山以南地区，平均暴雨日数基本超过40 d，多于北部地区。

如图7所示，所有地区的年平均暴雨量之间差异并不大，全省年平均暴雨量为67.48 mm。年平均暴雨量最大的地区为垣曲77.53 mm，最小的地区为大同58.27 mm。不同地区之间的暴雨日数差异明显，垣曲最大累积暴雨日数为83 d，而天镇只有15 d，从侧面反映出山西省降水空间分布不均匀。总体来说，降水量大的地区极端降水事件发生的频率也高，尤其是垣曲、五台山、阳城，年平均暴雨量都在65 mm以上，累积暴雨日数超过60 d，这几个地区遭受暴雨灾害的概率较大。

3.3 山西省暴雨灾害风险评估

3.3.1 致灾因子的危险性评估 山西省暴雨灾害致灾因子危险等级（图8a）划分为低危险区、次低危险区、中危险区、次高危险区、高危险区。图中山西省南部的致灾因子危险指数整体高于北方地区。高危险区包括垣曲、阳城、安泽和海拔较高的五台山地区；低危险区包括右玉、大同、天镇、灵丘；次低危险区主要包括河曲、五寨、朔州、太谷、永济；中危险区包括太原、离石、介休、兴县、平定、原平、隰县、长治；次高危险区包括吉县、临汾、运城、侯马、榆社、襄垣。

3.3.2 孕灾环境的敏感性评估 山西省暴雨灾害孕灾环境敏感等级（图8b）分为低敏感区、次低敏感区、中敏感区、次高敏感区、高敏感区。高敏感区主要分布在太原、太谷、榆社、平定、襄垣、运城；次高敏感区主要分布在兴县、长治、侯马；中敏感区主要分布在大同、河曲、五寨、离石、安泽、吉县、垣曲、永济；次低敏感区主要分布在右玉、原平、灵丘、天镇、

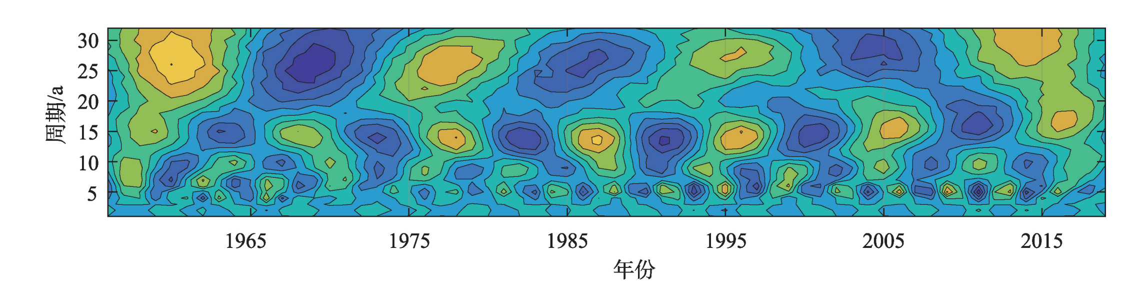


图4　1957—2019年山西省暴雨日数小波变换

Fig. 4　Wavelet transform of rainstorm days in Shanxi Province during 1957—2019

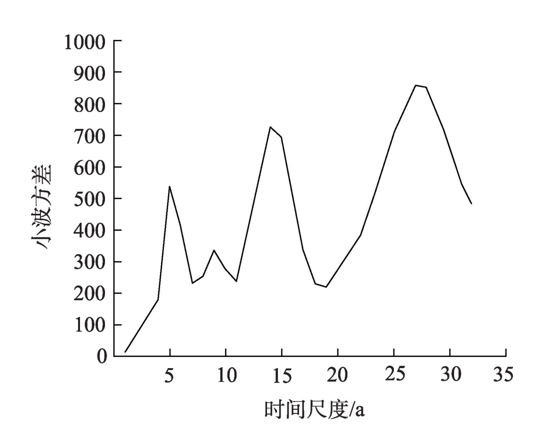


图5　小波方差

Fig. 5　Wavelet variance

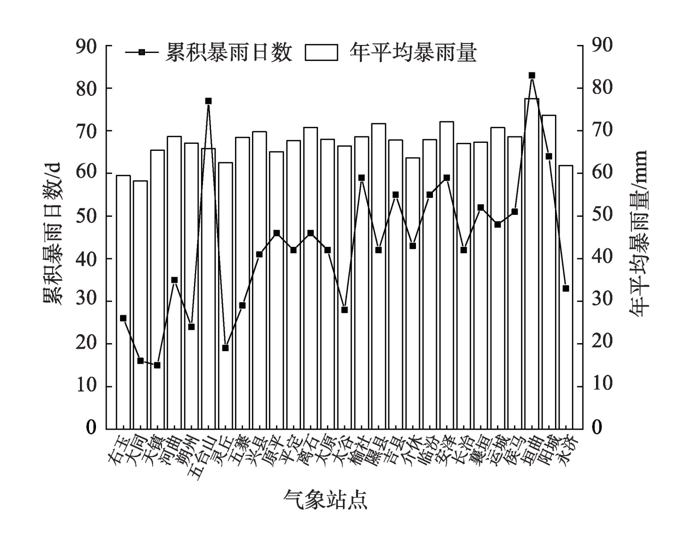


图7　27个气象站点累积暴雨日数和年平均暴雨量

Fig. 7　Cumulative rainstorm days and annual average rainstorm amount at the 27 meteorological stations

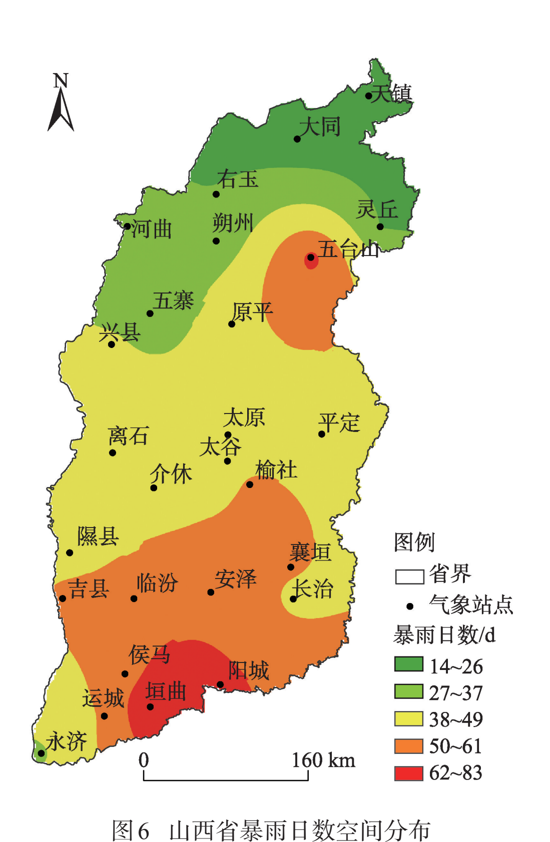


图6　山西省暴雨日数空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of rainstorm days in Shanxi Province

介休、隰县、临汾、阳城；低敏感区主要分布在五台山和朔州。

3.3.3　承灾体的脆弱性评估　山西省暴雨承灾体脆弱等级(图8c)分为：低脆弱区、次低脆弱区、中脆弱区、次高脆弱区、高脆弱区。高脆弱区和次高脆弱区主要分布在：大同、长治、天镇；中脆弱区主要分布在侯马、运城、永济、临汾、垣曲、阳城、襄垣、右玉；次低脆弱区主要分布介休、太原、太谷、榆社、安泽、平定、河曲、朔州、五台山、灵丘；低脆弱区主要分布在：五寨、原平、兴县、离石、隰县、吉县。研究区域70%以上都属于低脆弱区或次低脆弱区，高脆弱区发生在耕地比重大且人口密度大的大同，次高脆弱区为长治和天镇。

3.3.4　防灾减灾能力评估　防灾减灾能力是指灾害风险区在灾害来临前的预防灾害能力和发生灾害后修复损失的能力。城市发展得越成熟，防灾减灾能力越强。山西省防灾减灾能力等级(图8d)分为：低减灾能力区、次低减灾能力区、中减灾能力区、次

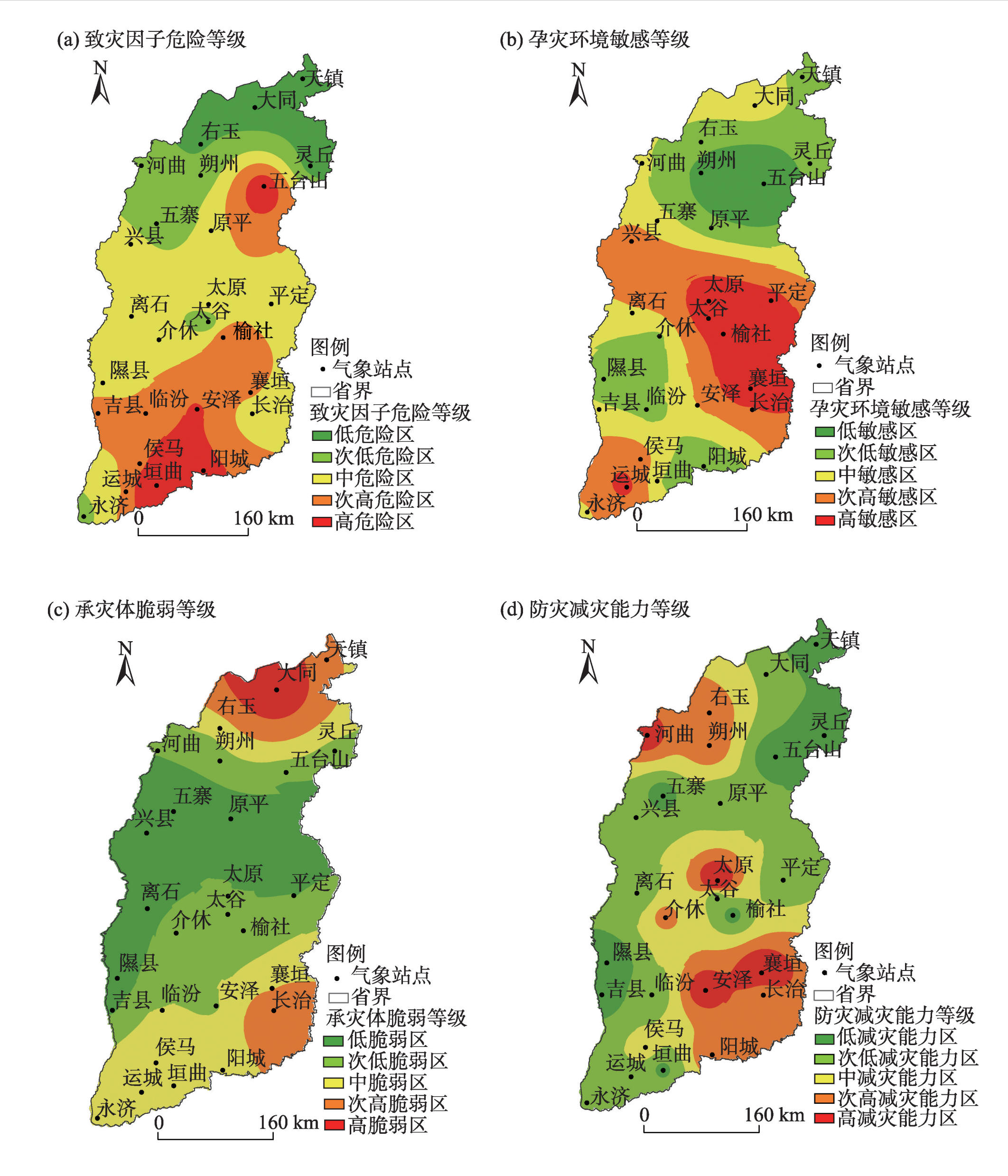


图8 山西省暴雨灾害风险等级划分

Fig. 8 Risk classification of rainstorm disaster risk in Shanxi Province

高减灾能力区、高减灾能力区。高减灾能力区包括太原、襄垣、安泽、河曲；次高减灾能力区包括长治、阳城、介休、右玉、朔州；中减灾能力区包括侯马；次低减灾能力区包括大同、兴县、原平、离石、平定、太谷、临汾、永济、运城；低减灾能力区包括天镇、灵丘、五台山、五寨、榆社、隰县、吉县、垣曲。整体分布特征呈现自中部向东北、西南方向递减的趋势，市区普遍高于县区。

3.3.5 暴雨灾害风险综合评估 结合山西省暴雨灾害综合风险等级划分(图9)可以看出，空间分布上总体呈由南向北逐渐递减的趋势，其中高风险区为运城盆地东北部，低风险区位于山西省东北、西北地区。从暴雨灾害综合风险等级来看，山西省中部和南部属于暴雨灾害高风险地区。据统计，山西省1971—1980年10 a间晋南黄河流域发生暴雨196次，汾河流域发生暴雨177次，漳山河流域发生148次，而北部的永定河和大清河流域仅发生了84次，山西省暴雨特征呈现南多北少、山地多于盆地的特征[34]。垣曲县属于暴雨灾害的高发地区，1961—2000年40 a间暴雨灾害次数达到了39次[35]。评估结果显示，垣曲县致灾因子危险等级、孕灾环境敏感等级、承灾体脆弱等级、防灾减灾能力等级分别属于高危险区、中敏感区、中脆弱区、低减灾能力区，按照权重综合叠加后均属于暴雨灾害风险指数

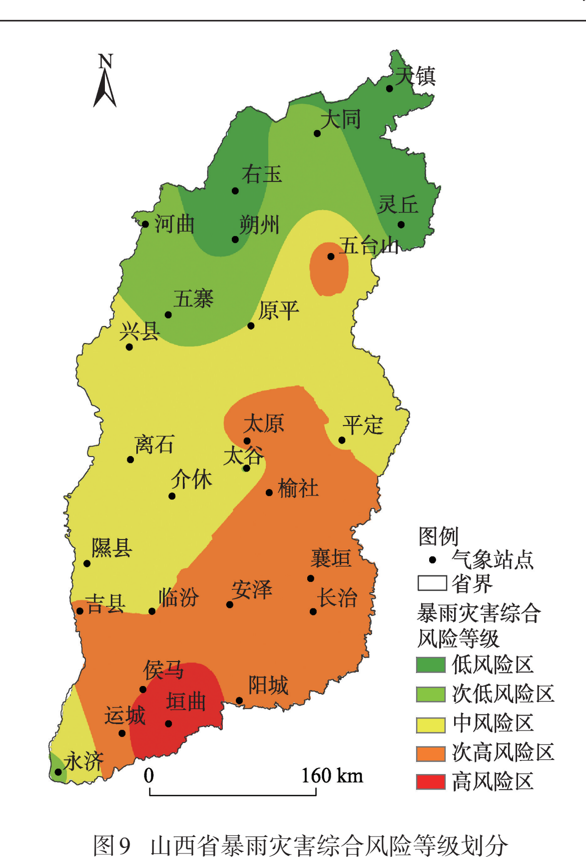


图9 山西省暴雨灾害综合风险等级划分

Fig. 9 Comprehensive risk classification of rainstorm disaster in Shanxi Province

等级的高风险区。

4 讨 论

山西省暴雨活动频繁,暴雨主要集中在夏季,具有明显的年际变化和年内变化特征,这与我国暴雨活动的主要特征相吻合[3]。根据年累积暴雨日数和年平均暴雨量变化规律,可以预测在未来几年是暴雨活动频繁的阶段,发生暴雨灾害概率较高。山西省暴雨发生的次数呈现增加趋势且周期缩短,但无论是9 a和14~15 a还是27~28 a的震荡周期,目前仍处于暴雨高发时期,这与全球气候变化背景下,极端恶劣天气发生频率增加的变化相一致[36]。山西省暴雨空间分布整体呈现由东南向西北递减趋势,主要受天气系统和地形地貌因素影响,其中天气系统的影响机制还有待深入探究。在暴雨灾害风险评估中,主要影响因子是降雨量、暴雨日数等,山西省山脉、盆地众多,南部地势低平,又位于迎风坡,降水丰富且集中,而北部地区,由于受高大山脉的阻挡作用,水汽削弱难以抵达,降水较少[8]。山西省暴雨灾害综合风险指数等级空间分布特征,主要由山西省的气候和地形特征所决定,区域内山地面积占比大,水土流失严重,暴雨来临时极易引起山洪爆发[15]。

5 结 论

通过对1957—2019年山西省暴雨的时空分布特征及灾害风险评估分析,得出以下结论:

(1) 从时间上看,山西省暴雨季节变化明显,主要集中在夏季,6—8月暴雨量占全年暴雨比重为85.23%,7月最多(45.18%)。山西省年均暴雨量各年份差距不大,但年累积暴雨日数年际差距较大,年平均暴雨量和年累积暴雨日数两者变化趋势大致拟合。

(2) 从空间上来看,以恒山为界,界线以南强降水发生的概率和暴雨量高于北部区域。受地理位置和地形影响,垣曲、五台山、阳城的平均暴雨量均在65 mm以上,累积暴雨日数均在60 d以上,为暴雨事件的高发区,这3个地区更易受暴雨灾害威胁。

(3) 根据小波分析发现,山西省暴雨日数年际变化存在5 a、9 a、14~15 a、27~28 a 4个时间尺度的震荡周期。

(4) 山西省暴雨灾害综合风险等级呈现从南向北递减的趋势,中部和南部属于暴雨灾害发生的高风险区。五台山、垣曲、阳城、安泽为致灾因子危险等级的高危险区;太原、太谷、榆社、平定、襄垣、运城为孕灾环境敏感等级的高敏感区;大同属于承灾体脆弱等级的高脆弱区;河曲、太原、安泽、襄垣属于防灾减灾能力等级的高减灾能力区;在暴雨灾害综合风险等级评估中,垣曲属于暴雨灾害高风险地区,而天镇、灵丘、右玉、朔州为低风险区。

以上结论,不仅呈现山西暴雨事件时空分布特征及重现规律,同时对暴雨灾害风险进行科学评估与区划,与实际情况基本相符。在本研究基础上,应进一步探讨建立健全暴雨灾害监测、预警及应急机制。结合山西省暴雨发生的时空规律,相关部门应当注重和提高暴雨灾害预报的准确性,结合地区自然与人文地理环境,合理规划防灾减灾,以及灾后重建恢复工作。

参考文献(References)

[1] 黄垭飞, 管兆勇, 蔡倩, 等. 近41年来江南地区暴雨洪涝灾害时

空变化特征分析[J]. 气象学报, 2021, 79(4): 582-597. [Huang Yafei, Guan Zhaoyong, Cai Qian, et al. Spatiotemporal variation characteristics of rainstorms and related flood disasters in Jiangnan region in the recent 41 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(4): 582-597.]

[2] 陈颖, 马禹. 新疆不同等级暴雨洪涝灾害的时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1515-1524. [Chen Ying, Ma Yu. Spatial and temporal characteristics of flood and rainstorm disaster in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1515-1524.]

[3] 冯强, 王昂生, 李吉顺. 我国降水的时空变化与暴雨洪涝灾害[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(1): 89-95. [Feng Qiang, Wang Angsheng, Li Jishun. The variation of precipitation in time and space and heavy-rain flood disaster in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1998, 7(1): 89-95.]

[4] 黄明策. 广西暴雨时空分布特征[J]. 广西气象, 2006, 27(3): 9-13. [Huang Mingce. Rainstorm space and time distributed characteristic in Guangxi[J]. Journal of Guangxi Meteorology, 2006, 27(3): 9-13.]

[5] 卢瑞荆, 樊兰峰. 1961—2008年贵州暴雨时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(3): 17-21. [Lu Ruijing, Fan Lanfeng. Spatial and temporal characteristics of rainstorm in Guigzhou during 1961—2008[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2010, 4(3): 17-21.]

[6] 孔锋. 中国不同月份暴雨的多属性时空演变特征及区域差异(1961—2016年)[J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 26-37. [Kong Feng. Multi-attribute spatio-temporal evolution characteristics and regional differences of heavy rainfall in different months in China from 1961 to 2016[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2): 26-37.]

[7] 侯春梅, 陈忠民, 康雯瑛, 等. 河南汛期暴雨时空分布特征及成因分析[J]. 气象与环境科学, 2008, 31(2): 39-42. [Hou Chunmei, Chen Zhongmin, Kang Wenying, et al. Distribution and cause analysis of the flood season rainstorm in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2008, 31(2): 39-42.]

[8] Brooks H E, Stensrud D J. Climatology of heavy rain events in the United States from hourly precipitation observations[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128: 1194-1201.

[9] Hail J W, Sayers P B, Dawson R J. Nation-scale assessment of current and future flood risk in England and Wales[J]. Natural Hazards, 2005, 35(1): 147-164.

[10] 丁一汇. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 395-406. [Ding Yihui. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 395-406.]

[11] 赵子惜, 陈志和. 基于CMORPH融合降水的中国暴雨时空分布特征分析[J]. 人民珠江, 2020, 41(8): 41-52. [Zhao Zixi, Chen Zhihe. Temporal and spatial distribution characteristics of rainstorm in China based on CMORPH integrated precipitation[J]. Pearl River, 2020, 41(8): 41-52.]

[12] 胡畔, 陈波, 史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. 地理学报, 2021, 76(5): 1148-1162. [Hu Pan, Chen Bo, Shi Peijun. Spatiotemporal patterns and influencing factors of rainstorm-induced flood disasters in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(5): 1148-1162.]

[13] Rahmati O, Zeinivand H, Besharat M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7(3): 1000-1017.

[14] 裴惠娟, 陈晋, 李雯, 等. 甘肃省暴雨洪水时空分布及风险评估[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(3): 167-175. [Pei Huijuan, Chen Jin, Li Wen, et al. Spatiotemporal pattern and risk assessment of storm flood in Gansu Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(3): 167-175.]

[15] 杨幸, 王平, 任宾宾. 基于GIS的汉中市气象灾害风险评估[J]. 江西农业学报, 2019, 31(1): 67-77. [Yang Xing, Wang Ping, Ren Binbin. Risk assessment of meteorological disasters in Hanzhong City based on GIS[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(1): 67-77.]

[16] 周月华, 彭涛, 史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 494-501. [Zhou Yuehua, Peng Tao, Shi Ruiqin. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood disasters in China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5): 494-501.]

[17] 孙鹏. 宣城市暴雨分布规律与暴雨洪涝灾害风险评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016. [Sun Peng. Evaluation of rainstorm distribution and rainstorm flood disaster risk in Xuancheng City[D]. Heifei: Heifei University of Technology, 2016.]

[18] 刘慧, 刘波, 许霞, 等. 基于突变理论的湖南衡阳暴雨灾害风险评估[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 221-226. [Liu Hui, Liu Bo, Xu Xia, et al. Risk assessment of rainstorm disaster based on catastrophe in Hengyang of Hunan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 221-226.]

[19] Haruyama S, Ohokura H, Simking T, et al. Geomorphological zoning for flood inundation using satellite data[J]. GeoJournal, 1996, 38(3): 273-278.

[20] 张丽花, 延军平, 陈利民. 近52年山西暴雨气候变化特征分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 142-148. [Zhang Lihua, Yan Junping, Chen Limin. Characteristic analysis of rainstorm climate change in Shanxi Province during recent 52 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 142-148.]

[21] 袁瑞强, 王亚楠, 王鹏, 等. 降水集中度的变化特征及影响因素分析——以山西为例[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 11-20. [Yuan Ruiqiang, Wang Ya'nan, Wang Peng, et al. An analysis of precipitation concentration variation characteristic and influential factors in Shanxi Province, China[J]. Climate Change Research, 2018, 14(1): 11-20.]

[22] 王文娟, 李丽平. 山西省主要气象灾害特征及风险评估——基于暴雨洪涝灾害气象数据融合的实证视角[J]. 科技导报, 2017, 35(8): 81-87. [Wang Wenjuan, Li Liping. Main meteorologi-

cal disasters and risk assessment in Shanxi Province: Based on empirical analysis of rainstorm and flood disaster data[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(8): 81-87.]

[23] 赵彩萍, 周晋红, 李兆奇, 等. 城市化对太原暴雨变化的影响[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 109-118. [Zhao Caiping, Zhou Jinhong, Li Zhaoqi, et al. Influence of urbanization on the change of rainstorm in Taiyuan[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1): 109-118.]

[24] 苗爱梅, 王洪霞, 武捷. 山西不同历时强降水的统计特征及趋势变化[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 796-807. [Miao Aimei, Wang Hongxia, Wu Jie. Statistical characteristic and trend change of different duration short-duration heavy rainfall in Shanxi Province[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 796-807.]

[25] 山西省统计局. 山西省2019年国民经济与社会发展统计公报[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [Shanxi Statistical Bureau. Statistical bulletin on national economy and social development of Shanxi Province[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]

[26] 山西省统计局. 山西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1957—2019. [Shanxi Statistical Bureau. Shanxi statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 1957—2019.]

[27] 李晓虹, 苏占胜, 纳丽, 等. 贺兰山东麓暴雨气候特征及灾害防御对策[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1231-1239. [Li Xiaohong, Su Zhansheng, Na Li, et al. Climate characteristics of rainstorm and disaster prevention countermeasures along eastern Helan Mountain[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1231-1239.]

[28] 张应华, 宋献方. 水文气象序列趋势分析与变异诊断的方法及其对比[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 652-665. [Zhang Yinghua, Song Xianfang. Techniques of abrupt change detection and trends analysis in hydroclimatic time-series: Advance and evaluation[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 652-665.]

[29] 冯禹昊, 朱江玲. 基于Morlet小波的辽河径流量变化及其成因分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 208-215. [Feng Yuhao, Zhu Jiangling. Analysis on runoff change and the driving force of the Liaohe River Basin based on wavelet Moelet[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 208-215.]

[30] 康丽玮. 陕西秦岭南北地区暴雨时空分布与暴雨灾害风险评估[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014. [Kang Liwei. Spatial-temporal distribution of rainstorm and risk assessment of rainstorm disaster in northern and southern Qinling Mountains of Shaanxi Province [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014.]

[31] 周轶, 陈柳彤, 黄靖玲, 等. 典型降雨情景下北京市十渡镇山洪灾害风险评估[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 97-102. [Zhou Yi, Chen Liutong, Huang Jingling, et al. Flash flood risk assessment in Shidu, Beijing under the typical rainfall scenario[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 97-102.]

[32] 李柔珂, 李耀辉, 徐影. 未来中国地区的暴雨洪涝灾害风险预估[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 341-352. [Li Rouke, Li Yaohui, Xu Ying. Projection of rainstorm and flooding disaster in China in the 21st century[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 341-352.]

[33] 刘荆, 蒋卫国, 杜培军, 等. 基于相关分析的淮河流域暴雨灾害风险评估[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 735-740. [Liu Jing, Jiang Weiguo, Du Peijun, et al. Rainstorm risk assessment of Huaihe River based on correlation analysis[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 735-740.]

[34] 王林旺. 山西省暴雨成因及时空分布研究[J]. 中国水利, 2003, 54(12): 74-75. [Wang Linwang. Study on causes and spatial and temporal distribution of rainstorm in Shanxi Province[J]. China Water Resources, 2003, 54(12): 74-75.]

[35] 魏海茹, 刘婉莉. 运城市突发气象灾害区域分析[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(18): 168-169. [Wei Hairu, Liu Wanli. Analysis on the burst weather disaster areas in Yuncheng City[J]. Journal of Library and Information Science, 2007, 17(18): 168-169.]

[36] 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 中国长短历时暴雨时空变化格局及其对总暴雨贡献的研究(1951—2010)[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊2): 316-320. [Kong Fei, Fang Jian, Lü Lili, et al. Long and short duration heavy rainfall spatio-temporal patterns change and its contribution to total heavy rainfall in China (1951—2010)[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26 (Suppl. 2): 316-320.]

Spatiotemporal distribution characteristics of rainstorm and risk assessment of rainstorm disasters in Shanxi Province from 1957 to 2019

LI Lele[1], CHAO Jinlong[1], ZHAO Deyi[2], LI Haojie[1], WU Lindong[3], LI Jiajun[1]

(1. School of Geographical Sciences, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. Gujiao Meteorological Bureau, Taiyuan 030200, Shanxi, China; 3. Shanxi Meteorological Information Center, Taiyuan 030600, Shanxi, China)

Abstract: Wavelet analysis and other methods were used to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of rainstorm in Shanxi Province of China based on the daily precipitation data of 27 meteorological stations in Shanxi Province from 1957 to 2019. Based on the theory of natural disaster, the decision analysis method (AHP) is used to conduct the risk assessment of rainstorm disasters. The following results were obtained: (1) Regarding the timescale, the time of rainstorm has presented periodicity and seasonality. The interannual variation of rainstorm has four-timescale oscillations of 4 years, 9 years, 14−15 years, and 27−28 years. The oscillation period shortened, and the frequency shows an increasing trend. Rainstorm season uneven distribution mostly concentrated in the summer and the probability of the formation of rainstorm disasters was great. The number of cumulative rainstorm days between June and August each year accounted for 85.23% of the total, with July accounting for the largest proportion of 45.18%. (2) Regarding the spatial scale, the rainstorm mostly occurs in the central and southern parts and the mountainous areas with higher altitudes, presenting a decreasing trend from southeast to northwest and obvious regional differences. The heavy rainfall and the amount of rainstorm in the south area show a high probability than the north area with Hengshan as the boundary, among which the annual average rainstorm is more than 65 mm in Yuanqu, Wutaishan, and Yangcheng meteorological stations, and the number of cumulative rainstorm days is over 60 days. (3) The result of the assessment of rainstorm disaster risk shows that the comprehensive risk classification of rainstorm disaster in Shanxi Province shows a decreasing trend from south to north. The northeast of the Yuncheng Basin belongs to the high-risk area, while the northeast and northwest of Shanxi Province belong to the low-risk area. The rest belong to the medium-risk and the sub-high-risk areas.

Key words: rainstorm; wavelet analysis; spatiotemporal distribution; disaster risk assessment; Shanxi Province